

УДК 621.372

А.В. Грицунов<sup>1</sup>, О.Н. Штельма<sup>2</sup><sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники<sup>2</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н.Бекетова

## ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГОРОДСКОГО ЛАНДШАФТА

*Рассмотрена возможность компьютерного повышения информативности изображений объектов городского ландшафта, полученных со спутника в условиях ограниченной разрешающей способности фотокамеры либо неоптимальных условий съемки. Использован алгоритм высокочастотной цифровой фильтрации изображения с применением оконного взвешивания. Проведен выбор наиболее подходящего окна для изображений Google Maps. Установлено, что из классических окон оптимальным является гауссово окно.*

**Ключевые слова:** спутниковое изображение, четкость, цифровая фильтрация, оконное взвешивание, гауссово окно.

### Постановка проблемы

Мониторинг объектов городского ландшафта с использованием спутниковых изображений является быстроразвивающейся отраслью коммунального хозяйства. Спутниковые технологии наблюдений позволяют осуществлять мониторинг городских территорий на основе обработки цветных изображений с использованием географически привязанной информации для выбранных городов и поселков. Соответствующие технологии географических информационных систем (ГИС) развиваются в направлениях повышения информативности мониторинга, увеличения частоты обновления снимков, интегрирования баз данных различного назначения с использованием результатов аэрокосмических и наземных измерений и т.п.

К сожалению, одним из принципиальных недостатков данной отрасли является невысокое качество получаемых с орбиты изображений. Помимо физических помех и ограничений (уровня и направления освещенности объектов, влияния атмосферы, качества фотокамер и т.д.), играют роль соображения коммерческого и политического характера. Чем выше качество заказанных изображений – тем выше их стоимость. Далеко не каждый потребитель в состоянии оплатить тот объем и разрешение фотографий, которые позволяют ему получить ощутимую выгоду от спутникового мониторинга, особенно в случае, когда необходимо произвести одноразовую оценку состояния того или иного участка поверхности. Чаще такая ситуация возникает в городах. Поэтому здесь на первый план выдвигаются программы и программные системы, позволяющие с помощью компьютерных технологий повысить информативность имеющихся недорогих либо

вообще бесплатных средств визуального мониторинга земной поверхности (наподобие Google Maps).

### Анализ последних исследований и публикаций

Как следует из анализа специфики рассматриваемой проблемы, характер контрастов изображений – основной признак, определяющий возможности и особенности дистанционного мониторинга Земли в оптической части спектра, поэтому общая систематизация всех объектов наблюдения по полученным визуальным изображениям производится, как правило, на этой основе [1].

Контраст зависит как от физических характеристик рассматриваемых земных покровов, так и от метеорологических условий. На величину контраста оказывает влияние облачность, которая увеличивает диффузию контуров границ объектов. Также контрасты находятся в сильной корреляционной зависимости от силы ветра, нивелирующее влияние которого весьма велико.

Существует несколько основных типов поверхностей: почвы, городская территория, растительность и водные объекты. Каждый из них имеет индивидуальную специфику светового отражения, обусловленную не только свойствами материала, но и условиями съемки.

Характер контрастов объектов земной поверхности зависит от большого количества факторов, связанных с физическими параметрами объектов, изменениями внешних условий и определяется в первую очередь источником освещения и состоянием пути прохождения отраженного излучения. Изображения с высоким пространственным разрешением содержат

качественно новую информацию о земных ландшафтах. Это обстоятельство приводит к развитию новых подходов к обработке изображений, таких как фрактальный и мультифрактальный анализ [2, 3]. Однако возможности обычного цифровой фильтрации на сегодняшний день далеко не исчерпаны, что следует из большого количества публикаций по тематике исследования (см., например, [4 – 6]).

Целью данной статьи является разработка оптимального алгоритма фильтрации цифровых изображений, предоставляемых бесплатной службой Google Maps, с целью увеличения объема информации, визуально извлекаемой из них применительно к объектам городского ландшафта. Рассматривается монохромная версия программы.

### Изложение основного материала

С математической точки зрения алгоритм обработки изображений является достаточно простым и состоит из трех основных действий. Это, во-первых, прямое двумерное дискретное преобразование Фурье (анализ) исходной функции  $F(m_x, m_y)$  [7, 8]:

$$C(n_x, n_y) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{m_y=-N_y/2+1}^{+N_y/2} \sum_{m_x=-N_x/2+1}^{+N_x/2} F(m_x, m_y) \times \exp\left(-\frac{2\pi i n_x m_x}{N_x}\right) \exp\left(-\frac{2\pi i n_y m_y}{N_y}\right),$$

где  $C(n_x, n_y)$  – получаемые Фурье-гармоники изображения;

$N_x$  – размер изображения по оси  $x$  в пикселях;

$N_y$  – размер изображения по оси  $y$  в пикселях.

Далее следует фильтрация полученных гармоник  $C(n_x, n_y)$  высокочастотным фильтром по обоим координатам. Отфильтрованные гармоники подвергаются обратному двумерному дискретному преобразованию Фурье (синтезу) [7, 8]:

$$F(n_x, n_y) = \sum_{m_y=-N_y/2+1}^{+N_y/2} \sum_{m_x=-N_x/2+1}^{+N_x/2} C(m_x, m_y) \times \exp\left(\frac{2\pi i n_x m_x}{N_x}\right) \exp\left(\frac{2\pi i n_y m_y}{N_y}\right).$$

Несмотря на кажущуюся простоту, существует ряд проблем, которые необходимо преодолеть в ходе реализации методики обработки изображений. Одной из них является выбор алгоритма фильтрации гармоник изображения. Существует множество способов фильтрации [8, 9]. Простейшим является оконное взвешивание в частотной области с использованием подходящего окна [9]. В настоящее

время известно большое число всевозможных спектральных окон, которые могут быть использованы в алгоритмах цифровой фильтрации. Среди всех известных частотных окон наиболее простыми являются прямоугольное и гауссово. Первое осуществляет обнуление всех гармоник, частоты которых в одном и другом направлениях выходят за пределы окна, в то время как гармоники, частоты которых лежат в пределах окна, остаются без изменений:

$$C_{out}(n_x, n_y) = \begin{cases} 0, & \text{if } n_x < N_x - W_x \text{ and } n_y < N_y - W_y; \\ C_{in}(n_x, n_y), & \text{if } n_x \geq N_x - W_x \text{ or } n_y \geq N_y - W_y. \end{cases}$$

Другим часто используемым окном является гауссово (экспоненциально-квадратичное). Оно уменьшает амплитуды исходных гармоник на величину, пропорциональную экспоненте квадрата их расстояния в спектре по отношению к центру окна (или сумме квадратов расстояний по обоим направлениям). Для высокочастотного окна данная зависимость может быть выражена формулой:

$$C_{out}(n_x, n_y) = C_{in}(n_x, n_y) \times \exp\left(-4 \frac{(N_x/2 - |n_x|)^2}{N_x^2 W_x^2} - 4 \frac{(N_y/2 - |n_y|)^2}{N_y^2 W_y^2}\right).$$

В обеих формулах  $W_x$  и  $W_y$  – относительная ширина окна по координатам  $x$  и  $y$  соответственно.

Преимуществом прямоугольного окна является наглядность и простота контроля степени фильтрации гармоник. Однако ему в наибольшей мере присущ общий недостаток оконного взвешивания – краевые эффекты [8]. Реализуемые оконные фильтры не являются каузальными [9]. Это означает, что они не удовлетворяют принципу причинности, т.е. на обработанном изображении эффекты, сопутствующие изменению градации яркости, могут появляться раньше (выше или левее) самой градации. Некаузальность прямоугольного фильтра связана с тем, что его импульсная характеристика является функцией вида  $\sin(x)/x$ , которая, как известно, имеет медленное затухание в обе стороны от максимума.

Краевые эффекты приводят к появлению характерных ореолов вокруг резких границ объектов в отфильтрованном изображении, существенно снижающих эффект улучшения разборчивости мелких объектов. С этой точки зрения более предпочтительны окна, основанные на непрерывных функциях, например, упомянутое гауссово.

Другой проблемой при цифровой обработке изображений является быстродействие программы. Непосредственное вычисление сумм при прямом и обратном преобразованиях Фурье становится неприемлемым при размере изображений, начиная с  $640 \times 480$  пикселей. Поэтому в работе использованы алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) [10, 11].  $N$ -точечное БПФ требует выполнения примерно  $N \log_2 N$  сложений и  $N \log_2(N/2)$  умножений комплексных чисел, что значительно меньше, чем  $N^2$  действий, необходимых для раздельного вычисления  $N$  значений преобразования по  $N$ -точечной последовательности данных.

Полученное преобразованное изображение (как и исходное необработанное) отображается на экране монитора с помощью специальной программы визуализации, написанной на языке Фортран 90 с использованием соответствующих функций оконного интерфейса WinAPI.

В качестве примеров исходных изображений на рис. 1 показаны спутниковые фотографии фрагментов городского ландшафта г. Харькова: двор Харьковского национального университета радиоэлектроники (вверху – ул. Серповая, внизу – вход на стадион ХНУРЭ) и двор Харьковского национального университета городского хозяйства (слева – ул. Маршала Бажанова). Оба примера имеют как общие свойства, так и специфические особенности. В частности, на обоих снимках присутствуют характерные для города объекты: здания и сооружения, дороги и тротуары, деревья и прочие насаждения, автомобили. Однако первый снимок, очевидно, получен в неоптимальных метеорологических условиях (недостаточная контрастность изображения, вызванная, судя по всему, наличием атмосферной дымки). Второй, напротив, сделан в условиях высокой прозрачности атмосферы, однако наличие высоких инженерных сооружений (учебного корпуса) и низкое положение солнца создают контрастную тень на части ландшафта, затрудняющую визуальное восприятие объектов. Видно, что недостаточная четкость изображения затрудняет идентификацию типовых элементов городского пейзажа (автомобилей, тротуаров), а излишне высокая контрастность – распознавание объектов, расположенных в тени.



Рис. 1. Примеры исходных спутниковых изображений (вверху – двор ХНУРЭ, внизу – двор ХНУГХ)

Перед обработкой изображений городского ландшафта их целесообразно нормировать к максимальной контрастности (рис. 2). Это дает возможность привести объекты последующей фильтрации к равным условиям, что позволит точнее оценить эффективность применяемых частотных окон.

На рис. 3 и 4 показаны нормированные изображения, подвергнутые двумерной фильтрации с использованием широкого (относительная ширина  $W_x = 31/32$ ;  $W_y = 31/32$ ) и узкого ( $W_x = 15/16$ ;  $W_y = 15/16$ ) высокочастотных прямоугольных окон соответственно. Видна существенная разница в эффектах преобразования рисунков широкополосным и узкополосным фильтрами. В обоих случаях теряется привязка к «уровню черного», поскольку нулевая гармоника удаляется из спектра. Для некоторых изображений (например, полученных в условиях яркого освещения либо низкого положения солнца над горизонтом) это улучшает разборчивость объектов, попавших в тень высоких зданий и сооружений. Однако при относительно большой ширине фильтра повышается информационная значимость глобальной картины ландшафта, в то время как результаты фильтрации узким окном более приемлемы для распознавания мелких объектов (автомобилей, тротуаров и проч.).



Рис. 2. Нормированные исходные изображения

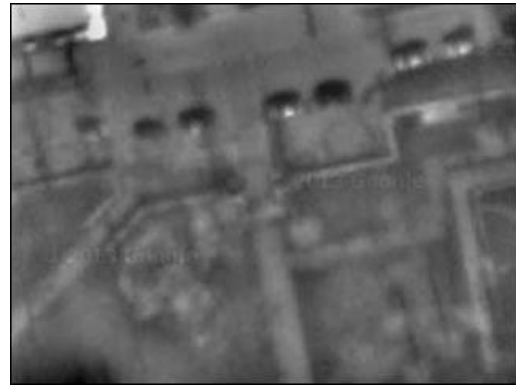


Рис. 3. Изображения, обработанные широким прямоугольным окном

На рис. 5 показаны картины тех же объектов, отфильтрованных широкополосным (относительная ширина  $W_x = 3$ ;  $W_y = 3$ ) гауссовым фильтром верхних частот. Контрастность изображения при сужении гауссового окна снижается медленнее, чем в случае прямоугольного окна. Однако четкость мелкомасштабных элементов рисунка также значительно ниже. Это связано с тем, что гауссово окно, в отличие от прямоугольного, ослабляет низкочастотные составляющие спектра, однако полностью их не устраняет.

При использовании узкополосного гауссового окна (относительная ширина  $W_x = 2$ ;  $W_y = 2$ ) контрастность изображения существенно уменьшается, однако информативность визуального восприятия мелких деталей растет (рис. 6). Положительный эффект особенно заметен при высокой контрастности исходного изображения (нижний рисунок).

Сравнение рис. 5 и 6 с рис. 3 и 4 соответственно позволяет заключить, что из простых спектральных окон лучшим с точки зрения информативности получаемых с его помощью изображений является гауссово. Однако теоретически возможно дальнейшее повышение эффективности цифровой фильтрации изображений за счет применения более сложных алгоритмов оконного взвешивания. К таковым следует отнести окна Хэмминга, Чебышева, Наттолла и др. [9].

Из вышеизложенного следует, что ослабление или полное устранение из спектра видеосигнала низших гармоник, отвечающих за передачу яркости крупных элементов рисунка, может снизить однородность яркости или цвета в пределах равномерно окрашенных полей, а также нарушить «уровень черного», т.е. корректное отображение освещенности наиболее темных элементов изображения. Однако увеличение при этом относительного уровня высших гармоник, передающих мелкие детали изображения, в ряде случаев повышает информационную ценность спутниковых изображений, особенно полученных в условиях неоптимальной освещенности или плохих погодных условий.

Существует, очевидно, некая оптимальная полоса пропускания фильтра, обеспечивающая разумный компромисс, выражающийся в максимальной разборчивости как крупных, так и мелких деталей в отфильтрованном изображении. Однако большинство прикладных задач заключаются в получении некоторой узкоцелевой информации (например, состояния зеленых насаждений), поэтому целесообразна предварительная экспериментальная адаптация формы и ширины частотного окна к специфике решаемой при конкретном мониторинге проблемы.



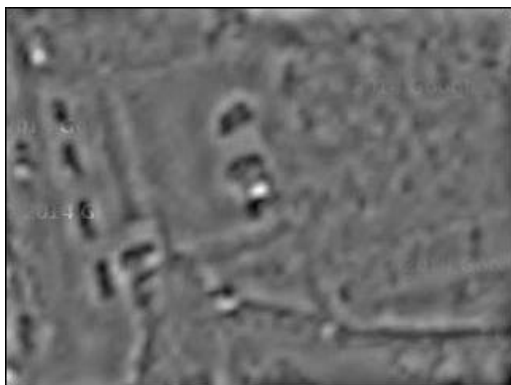
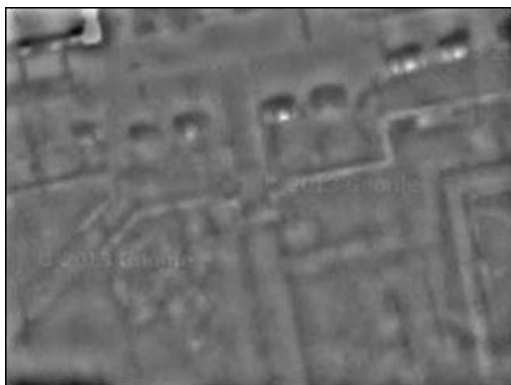


Рис. 4. Изображения, обработанные узким прямоугольным окном

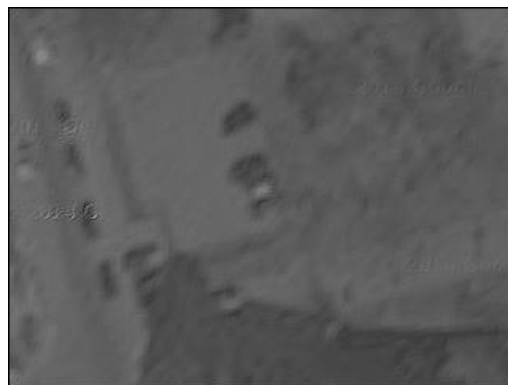


Рис. 6. Изображения, обработанные узким гауссовым окном



Рис. 5. Изображения, обработанные широким гауссовым окном

### Выводы

Разработанная методика обработки недостаточно четких спутниковых изображений, полученных в условиях ограниченного разрешения фотокамер или неоптимальных условий съемки, позволяет контролировать относительный уровень высших гармоник в спектре изображения, от которых зависит качество визуализации мелких элементов рисунка. Простота и удобство работы с программой выгодно отличают ее от различных универсальных пакетов инженерного назначения. Поэтому данная разработка может быть рекомендована для использования в геоинформационных системах, а также в учебном процессе на кафедрах ВУЗов соответствующего профиля, в частности, при создании виртуальных лабораторных макетов для проведения практических занятий. Дальнейшим развитием работы должно стать создание полноценной цветной версии программы.

**Автор:** ГРИЦУНОВ Александр Валентинович  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники, Харьков, доктор физико-математических наук, доцент.  
E-mail – gritsunov@list.ru

**Автор:** ШТЕЛЬМА Ольга Николаевна  
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, Харьков, старший преподаватель.

## Литература

1. Виноградов, Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем [Текст] / Б.В. Виноградов. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
2. Ильин, Ю.А. Комплексный анализ тепловых ИК изображений земной поверхности [Текст] / Ю.А. Ильин, Н.Е. Чуфарова // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 37-40.
3. Чуфарова, Н.Е. Фрактальный анализ районов городской застройки на снимках в тепловом ик диапазоне [Текст] / Н.Е. Чуфарова // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 1. – С. 62-67.
4. Пузаченко, Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях [Текст] / Ю.Г. Пузаченко. – М.: Академия, 2004. – 406 с.
5. Головкин, В.А. Современные технологии устранения влияния атмосферы на многоспектральные измерения высокого пространственного разрешения из космоса [Текст] / В.А. Головкин // Исслед. Земли из космоса. – 2006. – № 2. – С. 11-23.
6. Топчиев, А.Г. Комплексный космический и локальный мониторинг природно-техногенной сферы [Текст] / А.Г. Топчиев, Т.В. Кондранин, В.В. Козодеров // Экология и промышленность России. – 2006. – № 11. – С. 4-6.
7. Рабинер, Л.Р. Теория и применение цифровой обработки сигналов [Текст] / Л.Р. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
8. Отнес, Р., Прикладной анализ временных рядов [Текст] / Р. Отнес, Л. Энксон. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
9. Марпл-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С.Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
10. Нуссбаумер, Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток [Текст] / Г. Нуссбаумер. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.
11. Smith, S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing [Text] / S.W. Smith. – San Diego, CA: California Technical Publ., 1999. – 650 p.

## References

1. Vinogradov, B.V. Aerokosmicheskij monitoring ekosistem [Tekst] / B.V. Vinogradov. – M.: Nauka, 1984. – 320 s.
2. Il'in, Ju.A. Kompleksnyj analiz teplovyh IK izobrazhenij zemnoj poverhnosti [Tekst] / Ju.A. Il'in, N.E. Chufarova // Izv. vysshih uchebnyh zavedenij. Geodezija i aerofotosjemka. – 2011. – № 2. – S. 37-40.
3. Chufarova, N.E. Fraktal'nyj analiz rajonov gorodskoj zastrojki na snimkah v teplovom ik diapazone [Tekst] / N.E. Chufarova // Izv. vysshih uchebnyh zavedenij. Geodezija i aerofotosjemka. – 2012. – № 1. – S. 62-67.
4. Puzachenko, Ju.G. Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh [Tekst] / Ju.G. Puzachenko. – M.: Akademiya, 2004. – 406 s.
5. Golovko, V.A. Sovremennyye tehnologii ustraneniya vliyaniya atmosfery na mnogosppektral'nye izmereniya vysokogo prostranstvennogo razresheniya iz kosmosa [Tekst] / V.A. Golovko // Issled. Zemli iz kosmosa. – 2006. – № 2. – S. 11-23.
6. Topchiev, A.G. Kompleksnyj kosmicheskij i lokal'nyj monitoring prirodno-tehnogennoj sfery [Tekst] / A.G. Topchiev, T.V. Kondranin, V.V. Kozoderov // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. – 2006. – № 11. – S. 4-6.
7. Rabiner, L.R. Teoriya i primenenie cifrovoj obrabotki signalov [Tekst] / L.R. Rabiner, B. Gould. – M.: Mir, 1978. – 848 s.
8. Otnes, R., Prikladnoy analiz vremennyh rjadov [Tekst] / R. Otnes, L. Enokson. – M.: Mir, 1982. – 428 s.
9. Marpl-ml., S.L. Cifrovoj spektral'nyj analiz i jego prilozheniya [Tekst] / S.L. Marpl-ml. – M.: Mir, 1990. – 584 s.
10. Nussbaumer, G. Bystroje preobrazovaniye Fur'e i algoritmy vychisleniya svertok [Tekst] / G. Nussbaumer. – M.: Radio i svyaz', 1985. – 248 s.
11. Smith, S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing [Text] / S.W. Smith. – San Diego, CA: California Technical Publ., 1999. – 650 p.

## ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ МІСЬКОГО ЛАНДШАФТУ

О.В. Грицунов, О.М. Штельма

Розглянуто можливість комп'ютерного підвищення інформативності зображень об'єктів міського ландшафту, отриманих із супутника в умовах обмеженої роздільної здатності фотокамери або неоптимальних умов зйомки. Використано алгоритм високочастотної цифрової фільтрації зображення із застосуванням віконного зважування. Проведено вибір найбільш підходящого вікна для зображень Google Maps. Встановлено, що з класичних вікон оптимальним є гаусове вікно.

**Ключові слова:** супутникове зображення, чіткість, цифрова фільтрація, віконне зважування, гаусове вікно.

## THE RISE OF THE INFORMATION VALUE OF URBAN LANDSCAPE SATELLITE IMAGES

A.V. Gritsunov, O.N. Shtelma

The possibility of computer rise of information value of images of objects of the urban landscape taken with limited resolution cameras or in sub-optimal shooting conditions is considered. A high-frequency digital filtering algorithm with a windowing is used. The selection of the most appropriate window for Google Maps images was performed. It was established that the classical Gaussian window is the optimal one. The developed method of treatment of not enough clear satellite images allows controlling the relative level of higher harmonics in the spectrum of the image, which determines the quality of visualization of small picture elements. Simplicity and ease of working with the program distinguishes it from similar packages of universal engineering purposes. Therefore, this development may be recommended for use in geographic information systems, as well as in the educational process in the departments of universities of proper profile. In particular, this may be the creation of virtual laboratory models for student practical training.

**Keywords:** satellite image, definition, digital filtering, windowing, Gaussian window.